

Научная статья
УДК 66.047.1/639.3.07
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-4-128-136>
EDN OOXPGV

Оценка связи влаги с сухими веществами в биомассе культивируемых червей *Eisenia fetida* как компонента кормовых смесей аквакультуры

Д. А. Казарцев^{1✉}, А. Н. Харин²,
А. А. Берестовой³, Д. С. Хатунцов⁴, А. В. Антипов⁵

^{1, 4, 5}Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет),
Москва, Россия, kda_79@mail.ru✉

²Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, Россия

³Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, Россия

Аннотация. Одной из перспективных добавок, применяемых в аквакультуре, является биомасса культивируемых червей *Eisenia fetida*, содержащая в своем составе целый комплекс необходимых питательных веществ. Корма для рыб на основе сублимированного червя *Eisenia fetida* обладают высокой питательной ценностью и доказанной эффективностью. Ключевым этапом при производстве кормовой добавки является сушка биомассы, от правильного выбора способа которой во многом зависит качество конечного продукта. Представлены результаты исследования влагосвязывающей способности и форм связи влаги с сухими веществами в биомассе червей. В качестве объекта исследований использовали биомассу культивируемых червей *Eisenia fetida* из семейства дождевых червей (Lumbricidae), относящихся к типу кольчатые черви (Annelida). Исследование физического состояния и свойств воды в биомассе червей проводили на приборе STA 449 F3 Jupiter. Влагосвязывающую способность биомассы червей оценивали согласно методике, разработанной проф. В. М. Араповым, позволяющей определить среднеинтегральное значение прочности связи влаги с материалом в любом диапазоне влагосодержаний. Активность воды измерялась гигрометром Rotronic. В результате проведенных исследований установлены границы зон, соответствующих различным формам связи влаги, а также температурные зоны их удаления. Установлено количественное соотношение масс влаги различных форм связи. Показано, что в диапазоне влагосодержаний 7,5–2,5 кг_{вл}/кг_{сух.вещ} на удаление влаги из биомассы червей требуется энергии в 1,3 раза больше, чем на испарение влаги со свободной поверхности при тех же термодинамических условиях ведения процесса. Измерения активности воды подтвердили результаты термического анализа по содержанию значительного количества свободной воды для метаболической активности микроорганизмов. Полученные результаты по исследованию влагосвязывающей способности и форм связи влаги могут быть использованы для разработки рациональных режимных параметров процесса сушки биомассы червей и выбора наиболее эффективных способов энергоподвода.

Ключевые слова: культивируемые черви *Eisenia fetida*, термогравиметрический анализ, связь влаги с сухими веществами, активность воды, кормовые смеси

Для цитирования: Казарцев Д. А., Харин А. Н., Берестовой А. А., Хатунцов Д. С., Антипов А. В. Оценка связи влаги с сухими веществами в биомассе культивируемых червей *Eisenia fetida* как компонента кормовых смесей аквакультуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2025. № 4. С. 128–136. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-4-128-136>. EDN OOXPGV.

Assessment of moisture relationships in the biomass of cultured worms *Eisenia fetida* as a component of aquaculture feed mixtures

D. A. Kazartsev^{1✉}, A. N. Kharin², A. A. Berestovoy³, D. S. Khatuntsov⁴, A. V. Antipov⁵

^{1, 4, 5}K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University),
Moscow, Russia, kda_79@mail.ru✉

²Voronezh State University,
Voronezh, Russia

³Voronezh State University of Engineering Technologies,
Voronezh, Russia

Abstract. One of the promising additives used in aquaculture is the biomass of cultivated *Eisenia fetida* worms, which contains a whole complex of essential nutrients. Fish feeds based on freeze-dried worm *Eisenia fetida* have high nutritional value and proven effectiveness. The key step in the production of feed additives is the drying of biomass, the correct choice of which method largely determines the quality of the final product. The results of a study of the moisture binding ability and forms of moisture-dry matter bonding in the biomass of worms are presented. The biomass of cultivated *Eisenia fetida* worms from the family of earthworms (Lumbricidae), belonging to the Annelida type, was used as an object of research. The study of the physical state and properties of water in the biomass of worms was carried out on a STA 449 F3 Jupiter device. The moisture binding capacity of the worm biomass was evaluated according to the method developed by Professor V. M. Arapov, which makes it possible to determine the average integral value of the bond strength of moisture with the material in any range of moisture contents. The moisture binding capacity of the worm biomass was evaluated according to the methodology developed by Prof. It allows us to determine the average integral value of the bond strength of moisture with a material in any range of moisture contents. The water activity was measured with a Rotronic hygrometer. As a result of the conducted research, the boundaries of the zones advising various forms of moisture bonding, as well as the temperature zones for their removal, have been established. The quantitative ratio of moisture masses of various forms of bonding has been established. It is shown that in the range of moisture contents 7.5-2.5 kg_m/kg_{d.mat} removing moisture from the biomass of worms requires 1.3 times more energy than evaporation of moisture from a free surface under the same thermodynamic conditions of the process. Measurements of water activity confirmed the results of thermal analysis on the content of a significant amount of free water for the metabolic activity of microorganisms. The obtained results on the study of moisture binding capacity and forms of moisture bonding can be used to develop rational operating parameters of the worm biomass drying process and select the most effective methods of energy supply.

Keywords: cultured *Eisenia fetida* worms, thermogravimetric analysis, moisture-dry matter relationship, water activity, feed mixtures

For citation: Kazartsev D. A., Kharin A. N., Berestovoy A. A., Khatuntsov D. S., Antipov A. V. Assessment of moisture relationships in the biomass of cultured worms *Eisenia fetida* as a component of aquaculture feed mixtures. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2025;4:128-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2025-4-128-136>. EDN OOXVPG.

Введение

В связи с возрастающим спросом на рыбу и продукты рыболовства продукция аквакультуры играет все более заметную роль в обеспечении населения продовольствием.

Особенность индустриальной аквакультуры заключается в ряде специфических требований к режиму кормления и составу кормовых смесей [1, 2]. Состав кормовых смесей значительно влияет на обменные процессы, происходящие в теле рыб, что определяет высокие требования к разработке и применению кормовых добавок. Разрабатываемые кормовые добавки должны восполнять баланс недостающих веществ и иметь направленное действие [1].

Перспективной добавкой для применения в кормовых смесях для рыб является сухая биомасса

культивируемых червей *Eisenia fetida* [3]. Культивируемый червь *Eisenia fetida* содержит необходимый для полноценного питания гидробионтов комплекс макронутриентов, таких как белки, жиры и углеводы, а также микроэлементы.

Сухая биомасса червя *Eisenia fetida* может быть использована для замены существующих компонентов кормов аквакультуры и является перспективной для применения в производстве готовых сбалансированных кормов [1, 4–6]. В настоящее время уже имеются технологии изготовления кормовых смесей для гидробионтов с применением сублимированного червя *Eisenia fetida*, обладающих высокой питательной ценностью [1] и доказанной эффективностью применения на примере африканского клариевого сома.

Важным этапом в технологии производства кормовой добавки является сушка биомассы червей. От правильности выбора способа и режимов сушки во многом зависит сохранность питательных веществ и качественные показатели готовых кормов [7–10]. Начальная влажность биомассы культивируемых червей *Eisenia fetida* составляет 80–85 %, а влажность сухой добавки всего 7–10 %. В процессе сушки должно быть удалено порядка 70–75 % влаги, что сопряжено не только со значительными энергозатратами на процесс, но и с существенным изменением структурно-механических, биологических и физико-химических свойств биомассы. Поэтому для реализации эффективного процесса сушки биомассы культивируемых червей *Eisenia fetida* очень важно изучить характер и прочность связи влаги с определением интервалов, на которых осуществляется преобразование веществ при повышении температуры [11, 12].

Изучение характера связи влаги и активности воды в биомассе червей, используемых в качестве кормовой добавки для гидробионтов, является актуальным и востребованным направлением в дальнейшем развитии аквакультуры, т. к. позволит не только правильно выбрать способ сушки, оце-

нить изменение качественных показателей готовых кормовых смесей, но и спрогнозировать срок годности готового продукта.

Цель работы – исследование состояния влаги в биомассе культивируемых червей *Eisenia fetida* для дальнейшего использования при выборе и обосновании режимов сушки.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований использовали биомассу культивируемых червей *Eisenia fetida* из семейства дождевых червей (Lumbricidae), относящихся к типу кольчатые черви (Annelida). Перед проведением исследования червей промывали от почвенного субстрата в дистиллированной воде в соотношении 5–7 частей воды к 1 части заготавливаемой массы червя и затем измельчали на мельнице.

Исследование физического состояния и свойств воды в биомассе червей проводили на приборе синхронного термического анализа модели STA 449 F3 Jupiter (рис. 1) с держателем образца (ДСК/ТГ) типа S в алюминиевом тигле с проколотой крышкой (пустой алюминиевый тигель с проколотой крышкой использовался как эталон), измерения проводились в среде азота класса 5,0 [11].

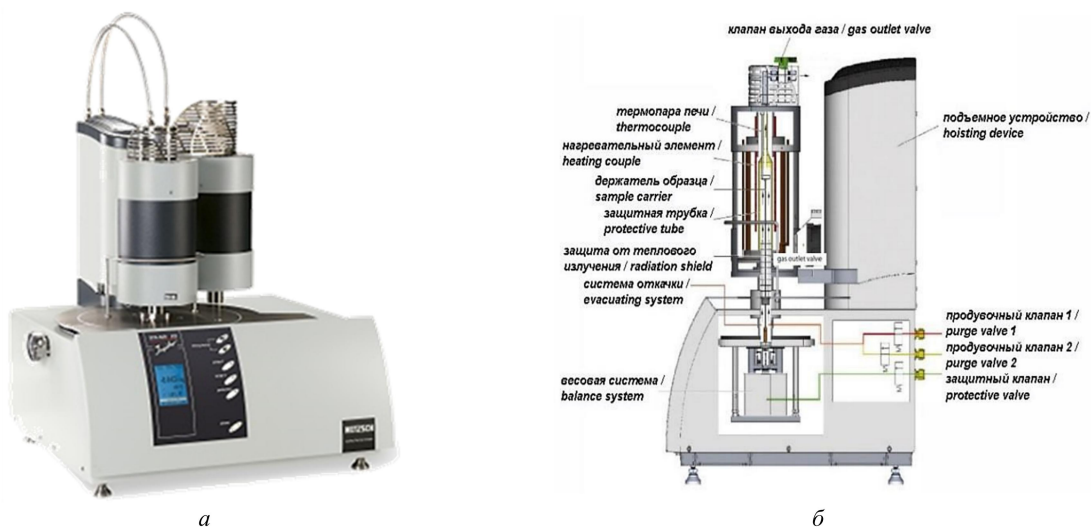


Рис. 1. Прибор синхронного термического анализа модели STA 449 F3 Jupiter (а); внутреннее устройство прибора (б)

Fig. 1. Synchronous thermal analysis device model STA 449 F3 Jupiter (a); the internal structure of the device (b)

Термоанализатор включает в себя весоизмерительную систему, держатель для образца, размещенный в камере печи, и подъемный механизм. Управление процессом измерения, регистрация данных о массе, температуре и времени осуществлялись компьютером с установленным программным обеспечением Proteus [11].

Принцип работы прибора синхронного термического анализа основан на непрерывном нагреве

материала по заданной программе в контролируемой газовой среде. При этом постоянно регистрируется изменение массы материала и температуры во времени. Влагосвязывающую способность биомассы червей оценивали методом, предложенным проф. В. М. Араповым [13, 14]. Этот метод позволяет определить среднеинтегральную прочность связи влаги с веществом в любом диапазоне влаго-содержаний. В основе метода лежит сравнение

скорости испарения свободной воды и среднеинтегральной скорости испарения влаги из исследуемого вещества при одинаковых термодинамических условиях сушки.

Скорость испарения свободной воды и среднеинтегральную скорость испарения влаги из биомассы червей определяли путем сушки двух образцов продукта с разным начальным влагосодержанием в идентичных условиях. В качестве первого образца использовали исходную биомассу червей, в качестве второго образца – эту же биомассу, но разбавленную дистиллированной водой из такого расчета, чтобы содержание сухих веществ в продукте не превышало $10 \pm 1,0$ %. При такой влажности второго образца в нем гарантированно содержится свободная влага, но при этом размеры и количество твердых частиц вещества были равными первому образцу. Молекулы воды, расположенные на периферии образца, испытывали крайне слабое влияние твердых частиц сухого вещества. Энергия, необходимая для испарения этих молекул, практически равна теплоте парообразования чистой воды. Сушка проводилась в термогравиметрическом инфракрасном влагомере FD-610 (рис. 2), который обеспечивал поддержание постоянной температуры 150 ± 1 °C и регистрацию изменения массы образца во времени.

Активность воды A_w биомассы червей определяли с помощью гигрометра Rotronic модификации NügroPalm с абсолютной погрешностью $\pm 0,008$.

Образец продукта помещался в специальный стаканчик в камере прибора, над которой располагался зонд для измерения влажности и температуры.



Рис. 2. Инфракрасный влагомер FD-610

Fig. 2. Infrared moisture meter FD-610

В процессе измерения на дисплее отображались значения активности воды A_w и температуры в камере. Результаты записывались после стабилизации этих показателей.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлена дериватограмма биомассы культивируемых червей *Eisenia fetida*.

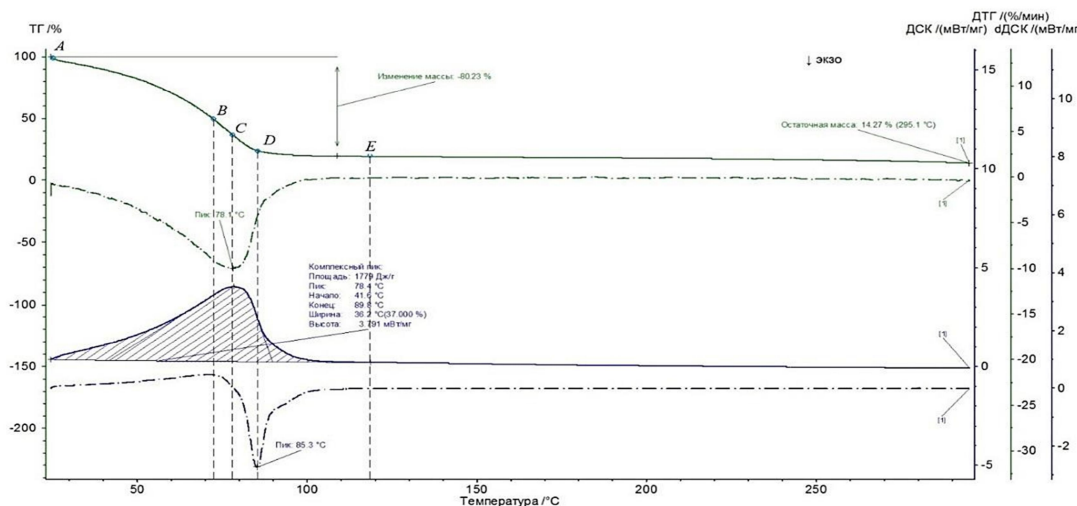


Рис. 3. Дериватограмма биомассы культивируемых червей *Eisenia fetida*: ТГ – термогравиметрическая кривая; ДТГ – кривая дифференциальной термогравиметрии; ДСК – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии; dДСК – производная кривой ДСК

Fig. 3. Derivatogram of biomass of cultivated *Eisenia fetida* worms: ТГ – thermogravimetric curve; ДТГ – differential thermogravimetry curve; ДСК – differential scanning calorimetry curve; dДСК – derivative of the ДСК curve

Анализ кривых изменения массы ТГ (термогравиметрическая кривая) и скорости изменения массы ДТГ (кривая дифференциальной термогравиметрии) свидетельствует о наличии в биомассе различных форм связи влаги с сухими веществами. Так, при ли-

нейно возрастающей температуре на графиках хорошо видны интервалы различной интенсивности увеличения и уменьшения скорости процесса удаления влаги, что обусловлено различными энергетическими затратами на удаление влаги различных форм.

С целью количественной оценки влаги различных форм в биомассе червей участок кривой изменения массы ТГ преобразовывали в зависимость степени изменения массы от температуры (рис. 4), для этого степень изменения массы рассчитывали как отношение изменения массы при данной температуре к общей массовой доле влаги, содержащейся в веществе:

$$\alpha = \frac{\Delta m}{\Delta m_{\text{общ}}}$$

Для установления интервалов температур удаления влаги различных форм связи, а также количества влаги, удаляемой из материала, использовали кривую, построенную в координатах $(-\lg\alpha) - 10^3 / T$ и представленную на рис. 5.

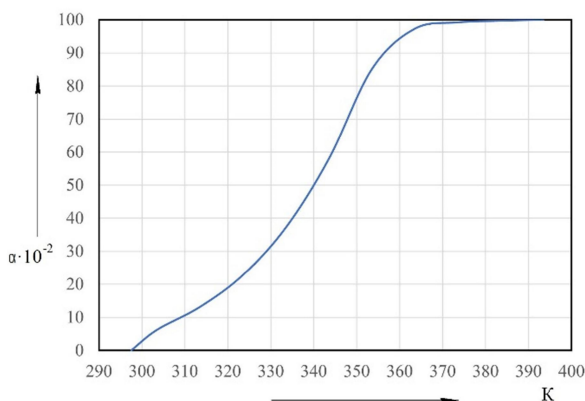


Рис. 4. Зависимость степени превращения вещества α от температуры T для биомассы червей

Fig. 4. Dependence of the degree of transformation of substance α on temperature T for worm biomass

Построенная зависимость (см. рис. 4) имеет S-образный вид, что также отражает нелинейный характер взаимосвязи влаги с сухим скелетом вещества и предполагает разные участки полученной кривой с различными скоростями дегидратации.

При сопоставлении характерных точек перегиба кривых на рис. 3–5 отчетливо наблюдаются 4 участка с различными формами связи влаги. Вначале на участке $A-B$ происходит нагрев образца и удаление свободной влаги. На рис. 3 кривая изменения массы на этом участке имеет выпуклость вверх, а скорость процесса удаления влаги увеличивается (кривая ДТГ). На рис. 5 интервал $A-B$ выражается первым прямолинейным участком. В точке B темп увеличения скорости замедляется, а кривая изменения массы (см. рис. 3) на участке $B-C$ носит прямолинейный характер. На рис. 5 данный интервал выражается вторым прямолинейным участком. Это обусловлено увеличением затрат на удаление влаги из материала. Следовательно, точка B является первой критической точкой на кривой сушки и определяет окончание процесса удаления свободной воды. Можно предположить, что на участке $A-C$ происходит удаление преимущественно механически и осмотически связанной влаги, обладающей невысокой энергией связи с веществом.

При дальнейшем проведении процесса скорость сушки резко начинает убывать. В точке C скорость процесса достигает максимума, а кривая измене-

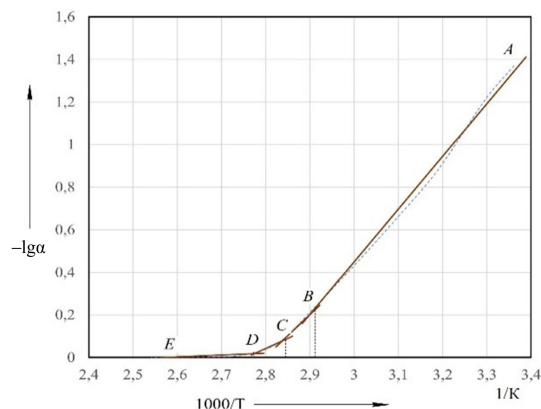


Рис. 5. Зависимость $(-\lg\alpha)$ от величины $10^3 / T$ для биомассы червей

Fig. 5. Dependence $(-\lg\alpha)$ on $10^3 / T$ for worm biomass

ния массы на участке $C-D$ (см. рис. 3) обращена выпуклостью вниз. На кривой изменения скорости массы ДТГ хорошо виден излом в точке C . На кривой ДСК наблюдается эндотермический эффект, сопровождающийся поглощением тепла и достигающий пика в точке C . На рис. 5 участок $C-D$ выражается третьим прямолинейным отрезком. Характер протекания процесса на участке $C-D$ свидетельствует о резком возрастании энергозатрат на испарение влаги из биомассы червей, т. е. удаление прочносвязанной влаги. Следовательно, точка C соответствует границе интервала адсорбционно связанной влаги в биомассе червей. Определение интервалов удаления полимолекулярно-адсорбционной и моноадсорбционной влаги по результатам термogravиметрического анализа представляется несколько затруднительным, поскольку энергия связи молекул воды с веществом при переходе к монослою непрерывно возрастает. Однако можно предположить, что точка D определяет данный переход, т. к. интенсивность падения скорости процесса удаления влаги (кривая ДТГ) в этот момент становится менее резкой, а на кривой дДСК виден перепад скорости поглощения энергии. Участок $D-E$ также обращен выпуклостью вниз. На рис. 5 участок $D-E$ выражается четвертым прямолинейным отрезком.

Окончание процесса сушки определяется точкой E , соответствующей переходу выпуклого участка на кривой ТГ в прямолинейный и переходу ско-

рости удаления массы вещества к минимальному постоянному значению (кривая ДТГ), а также окончанием эндотермического эффекта (кривая ДСК), связанного с поглощением теплоты на преодоление энергии связи молекул воды с веществом и их испарением. При дальнейшем увеличении температуры скорость процесса практически не изменяется, а изменение массы вещества незначительное, без

скачков. В этот период происходит деструкция вещества с выделением газообразных составляющих. Положение точки *E* на кривой ТГ позволяет определить начальную влажность образца.

Результаты определения количественного содержания влаги в биомассе червей и температурные интервалы удаления влаги представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Кинетические характеристики дегидратации влаги в биомассе червей *Eisenia fetida*

Kinetic characteristics of moisture dehydration in biomass of *Eisenia fetida* worms

Участок на кривой	Интервалы температур ΔT , К (°C)	$10^3 / T$	α , мг/мг	$-\lg \alpha$, мг/мг	Массовая доля удаляемой влаги (кривая ТГ)	
					Интервал изменения влагосодержания, кг _{вл} /кг _{сух.вещ}	Доля от общего количества влаги, %
A-B	297-345 (24-72)	3,37-2,90	0-0,58	1,37-0,24	7,2-2,25	68,8
B-C	345-351 (72-78)	2,90-2,85	0,58-0,85	0,24-0,07	2,25-0,80	20,1
C-D	351-359 (78-86)	2,85-2,79	0,85-0,97	0,07-0,01	0,80-0,14	9,17
D-E	359-392 (86-119)	2,79-2,54	0,97-1,00	0,01-0	0,14-0	1,93

Среднеинтегральную оценку связи влаги в биомассе червей *Eisenia fetida* проводили в диапазоне влагосодержаний $U_1 = 7$ кг_{вл}/кг_{сух.вещ} и $U_2 = 0,2$ кг_{вл}/кг_{сух.вещ}. Значение U_1 соответствовало концу периода прогрева, а значение U_2 – минимальному значению влагосодержания сухой биомассы, которая используется в производстве. Начальное влагосодер-

жание образца составляло $U_H = 7,55$ кг_{вл}/кг_{сух.вещ}. По результатам проведенных экспериментальных исследований построили графические зависимости изменения влагосодержания образцов исходной биомассы червей (рис. 6) и с добавлением дистиллированной воды (рис. 7) от времени сушки.

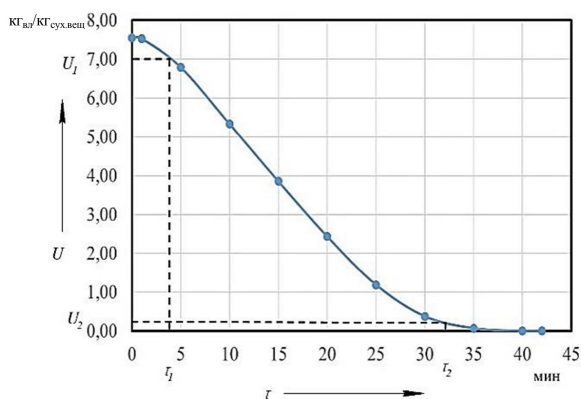


Рис. 6. Кинетика сушки исходной биомассы червей в инфракрасном влагомере FD-610

Fig. 6. Kinetics of drying of the initial biomass of worms in the infrared moisture meter FD-610

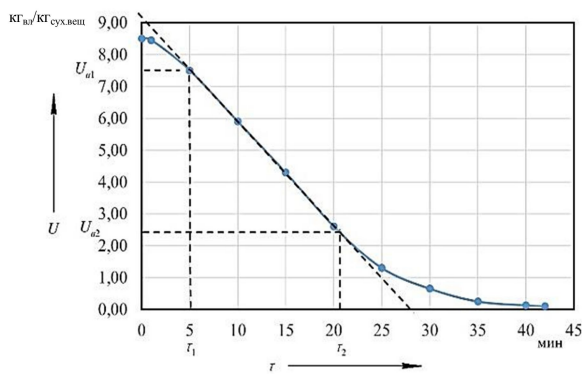


Рис. 7. Кинетика сушки биомассы червей с добавлением дистиллированной воды в инфракрасном влагомере FD-610

Fig. 7. Kinetics of drying worm biomass with the addition of distilled water in an infrared moisture meter FD-610

Скорость сушки и относительный эквивалент свободной влаги рассчитывали согласно методике, представленной в работе [13, 14], по следующим уравнениям:

– скорость сушки свободной влаги:

$$N_b = \frac{U_{b1} - U_{b2}}{\tau_{b2} - \tau_{b1}}, \quad (1)$$

где N_b – скорость сушки свободной влаги, c^{-1} ; U_{b1} , U_{b2} – влагосодержания второго образца, соответствующие началу и окончанию выбранного на кривой сушки прямолинейного участка, $кг_{вл}/кг_{сух.вещ}$; τ_{b1} ,

τ_{b2} – длительность сушки, соответствующая началу и окончанию прямолинейного участка, с;

– общий относительный эквивалент свободной влаги в диапазоне влагосодержаний U_1-U_2 :

$$\omega_{об}(U_1, U_2) = \frac{N_b \cdot \tau_c}{U_1 - U_2}. \quad (2)$$

Результаты расчета по уравнениям (1) и (2) с учетом влагосодержаний и времени сушки, определенных по кривым сушки (см. рис. 6 и 7), занесены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты сушки опытных образцов биомассы культивированных червей на термогравиметрическом влагомере FD-610

Results of drying experimental biomass samples of cultured worms on a thermogravimetric moisture meter FD-610

Время сушки 1-го образца τ_c , с	Влагосодержание 2-го образца, $кг_{вл}/кг_{сух.вещ}$		Время сушки 2-го образца, с		Скорость сушки свободной воды $N_b \cdot 10^3$, %/с	Общий относительный эквивалент свободной воды $\omega_{об} U_1, U_2$
	U_{b1}	U_{b2}	τ_{b1}	τ_{b2}		
1 710	7,5	2,5	300	1 260	520	1,3

Анализ полученных результатов сушки биомассы культивированных червей на термогравиметрическом влагомере позволил определить прочность связи влаги с сухими веществами: установлено, что на удаление влаги из биомассы в диапазоне влагосодержаний от 7,5 до 2,5 $кг_{вл}/кг_{сух.вещ}$ затраты энергии будут в 1,3 раза больше, чем затраты на испарение влаги со свободной поверхности при одинаковых термодинамических условиях ведения процесса.

По результатам измерения активности воды A_w в биомассе культивируемых червей значение 0,954 при температуре 298 К характеризует большое количество свободной для метаболической активности микроорганизмов воды по отношению к связанной. Это позволяет утверждать, что биомасса культивируемых червей *Eisenia fetida* не может быть подвержена длительному хранению без применения процесса сушки. Значение A_w хорошо коррелирует с результатами определения форм связи влаги в биомассе методом термогравиметрического анализа.

Заключение

Изучены формы связи влаги в биомассе культивируемых червей *Eisenia fetida* на основе термического анализа. Определены границы свободной, осмотически связанной полимолекулярно-адсорбционной и мономолекулярно-адсорбционной влаги

при термическом воздействии на биомассу червей, а также температурные зоны удаления влаги из материала различных форм связи. Установлено количественное соотношение масс влаги различных форм в биомассе червей.

По результатам изучения влагосвязывающей способности биомассы червей определено среднеинтегральное значение прочности связи влаги с сухими веществами в диапазоне влагосодержаний от 7,5 до 2,5 $кг_{вл}/кг_{сух.вещ}$. Установлено, что в данном диапазоне на удаление влаги из биомассы червей требуется энергии в 1,3 раза больше, чем на испарение влаги со свободной поверхности при тех же термодинамических условиях ведения процесса.

Результаты измерения активности воды в биомассе культивируемых червей показали, что в биомассе червей содержится значительное количество свободной для метаболической активности микроорганизмов воды, следовательно, биомасса не может быть подвержена длительному хранению без применения процесса сушки.

Полученные данные о температурных границах удаления различных форм влаги и их количественном соотношении создают основу для разработки энергоэффективных технологий сушки биомассы червей с сохранением ее пищевой ценности, что имеет важное значение для производства качественных кормовых добавок в аквакультуре.

Список источников

1. Бугаев О. Г., Леонов И. И., Климов В. А., Хатунцов Д. С., Пономарев А. К. Технология изготовления белковых кормовых смесей для гидробиянтов на основе культивируемых червей *Eisenia fetida* и *Dendrobena veneta* с применением технологии лиофильной сушки // Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 65–70.

2. Афанасьев В. А., Богомолов И. С., Остриков А. Н. Оценка потребительских качеств рыбных комбикормов нового поколения и их роль в продовольственном обеспечении // Инновационное предпринимательство: проблемы и пути их решения: материалы Нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 27–28 мая 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 124–127.

3. Титов И. Н. Дождевые черви как возобновляемый источник полноценного животного белка // Редакционная коллегия. 2013. С. 173.

4. Воробьев В. И., Нижникова Е. В., Лемперт О. Т., Нefeldова Н. П. Альтернативные источники получения аналогов рыбной муки // Изв. КГТУ. 2015. Т. 38. С. 74–82.

5. Измайлович И. Б., Якимович Н. Н. Импортозамещение рыбной муки новой кормовой добавкой // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2018. № 21 (1). С. 220–227.

6. Хатунцов Д. С., Ларкин А. Д. Аквакультура как наиболее эффективное средство восстановления популяции осетровых // Дельта науки. 2019. № 2. С. 135–139.

7. Бекетов С. В., Козлов А. В., Прадед М. Н., Климов В. А. Качественная оценка протеина рыбной муки, используемой в аквакультуре // Рыбное хозяйство. 2019. № 6. С. 58–61.

8. Антипов С. Т., Казарцев Д. А. Исследование влияния СВЧ-энергоснабжения на спектр белков при сушке пищевых продуктов // Материалы LX Отчет. науч. конф. преподавателей и науч. сотр. ВГУИТ за 2021 г. (Воронеж, 08–09 февраля 2022 г.) / под ред. О. С. Корнеевой. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та инженер. технол.,

2022. Ч. 2. С. 11.

9. Жумаев Б. М., Сафаров Ж. Э., Султанова Ш. А. Технологии сушки по результатам качественных показателей готовой продукции // Universum: технические науки. 2019. № 10-2 (67). С. 26–29.

10. Бунин Е. С., Калашников Г. В., Макеев С. В. Сравнительный анализ пищевой и кормовой ценности семян рапса, высушенных конвективным способом и с помощью СВЧ-энергоснабжения в закрученном потоке теплоносителя // Вестн. ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 3 (85). С. 32–38.

11. Шахов С. В., Саранов И. А., Садибаев А. К., Малибеков А. А., Литвинов Е. В., Груздов П. В. Исследование форм связи влаги в рапсе методом термогравиметрического анализа // Вестн. ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1. С. 27–31.

12. Остриков А. Н., Напольских М. С. Исследование форм связи влаги в растительно-мясной смеси на основе люпина, чечевицы и сублимированного мяса методом дифференциально-термического анализа // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. 2012. № 4 (42). С. 335–339.

13. Пат. № 2758198 С1 РФ, МПК G01N 25/56. Способ среднеинтегральной оценки прочности связи влаги в веществе в любом заданном диапазоне влагосодержаний / Арапов В. М., Акенченко М. А., Казарцев Д. А., Плотникова И. В., Полянский К. К.; № 2021107728: заявл. 24.03.2021; опубл. 26.10.2021.

14. Арапов В. М., Плотникова И. В., Казарцев Д. А., Полянский К. К., Магомедов Г. О., Копылов М. В., Плотников В. Е. Применение методики среднеинтегральной оценки водоудерживающей способности сахаросодержащих продуктов в кондитерском производстве // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 436–451.

References

1. Bugayev O. G., Leonov I. I., Klimov V. A., Khatuntsov D. S., Ponomarev A. K. Tekhnologiya izgotovleniya belkovykh kormovykh smesey dlya gidrobiontov na osnove kultiviruyemykh chervey *Eisenia fetida* i *Dendrobena veneta* s primeneniym tekhnologii liofilnoy sushki [Technology of production of protein feed mixtures for aquatic organisms based on cultured worms *Eisenia fetida* and *Dendrobena veneta* using freeze drying technology]. *Rybnoye khozyaystvo*, 2022, no. 4, pp. 65-70.

2. Afanasyev V. A., Bogomolov I. S., Ostrikov A. N. Otsenka potrebitelskikh kachestv rybnyykh kombikormov novogo pokoleniya i ikh rol v prodovolstvennom obespechenii [Assessment of consumer qualities of new generation fish feed and their role in food supply]. *Innovatsionnoye predprinimatelstvo: problemy i puti ikh resheniya: materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Voronezh. 27–28 maya 2022 g.)*. Voronezh, 2022. Pp. 124-127.

3. Titov I. N. Dozhdevyye chervi kak vozobnovlyayemyy istochnik polnotsennogo zhivotnogo belka [Earthworms as a renewable source of complete animal protein]. *Redaktsionnaya kollegiya*, 2013, p. 173.

4. Vorobyov V. I., Nizhnikova E. V., Lempert O. T., Nefeldova N. P. Alternativnyye istochniki polucheniya analogov rybnoy muki [Alternative sources for obtaining fish-meal analogues]. *Izvestiya KGTU*, 2015, vol. 38, pp. 74-82.

5. Izmaylovich I. B., Yakimovich N. N. Importozameshcheniye rybnoy muki novoy kormovoy dobavkoy [Import substitution of fish meal with a new feed additive]. *Aktualnyye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva*, 2018, no. 21 (1), pp. 220–227.

6. Khatuntsov D. S., Larkin A. D. Akvakultura kak naibolee effektivnoye sredstvo vosstanovleniya populyatsii osetrovykh [Aquaculture as the most effective means of restoring the sturgeon population]. *Delta nauki*, 2019, no. 2, pp. 135-139.

7. Beketov S. V., Kozlov A. V., Praded M. N., Klimov V. A. Kachestvennaya otsenka proteina rybnoy muki. ispolzuyemoy v akvakulture [Qualitative assessment of fish meal protein used in aquaculture]. *Rybnoye khozyaystvo*, 2019, no. 6, pp. 58-61.

8. Antipov S. T., Kazartsev D. A. Issledovaniye vliyaniya SVCh-energopodvoda na spektr belkov pri sushke pishchevykh produktov [Investigation of the effect of microwave energy supply on the protein spectrum during food drying]. *Materialy LX Otchetnoy nauchnoy konferentsii prepodavateley i nauchnykh sotrudnikov VGUIT za 2021 g. (Voronezh, 08–09 fevralya 2022 g.)*. Pod redaktsiyey O. S. Korneyevoy. Voronezh, Izd-vo Voronezh. gos. un-ta inzhener. tekhnol., 2022. Part 2. P. 11.

Kazartsev D. A., Khatin A. N., Bektsoyev A. A., Khatuntsov D. S., Antipov S. T. Assessment of moisture relationships in the biomass of cultured worms *Eisenia fetida* as a component of aquaculture feed mixtures

9. Zhumayev B. M., Safarov Zh. E., Sultanova Sh. A. Tekhnologii sushki po rezultatam kachestvennykh pokazateley gotovoy produktsii [Drying technologies based on the results of quality indicators of finished products]. *Universum: tekhnicheskiye nauki*, 2019, no. 10-2 (67), pp. 26-29.

10. Bunin E. S., Kalashnikov G. V., Makeyev S. V. Sravnitelnyy analiz pishchevoy i kormovoy tsennosti semyan rapsa, vysushennykh konvektivnym sposobom i s pomoshchyu SVCh-energopodvoda v zakruchennom potoke teplonositelya [Comparative analysis of the nutritional and feed value of rapeseed seeds dried convectively and using microwave energy supply in a swirling coolant stream]. *Vestnik VGUIT*, 2020, vol. 82, no. 3 (85), pp. 32-38.

11. Shakhov S. V., Saranov I. A., Sadibaev A. K., Malibekov A. A., Litvinov E. V., Gruzlov P. V. Issledovaniye form svyazi vlagi v rapse metodom termogravimetricheskogo analiza [Investigation of the forms of moisture bonding in rapeseed by thermogravimetric analysis]. *Vestnik VGUIT*, 2019, vol. 81, no. 1, pp. 27-31.

12. Ostrikov A. N., Napolkikh M. S. Issledovaniye form svyazi vlagi v rastitelno-myasnoy smesi na osnove lyupina, chechevitsy i sublimirovannogo myasa metodom differentsi-

alno-termicheskogo analiza [Investigation of the forms of moisture bonding in a vegetable-meat mixture based on lupine, lentils and freeze-dried meat by differential thermal analysis]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*, 2012, no. 4 (42), pp. 335-339.

13. Arapov V. M., Akenchenko M. A., Kazartsev D. A., Plotnikova I. V., Polyansky K. K. *Sposob sredneintegralnoy otsenki prochnosti svyazi vlagi v veshchestve v lyubom zadanom diapazone vlagosoderzhaniy* [A method for the average integral assessment of the bond strength of moisture in a substance in any given range of moisture contents]. Patent № 2758198 C1 RF, MPK G01N 25/56.; 26.10.2021.

14. Arapov V. M., Plotnikova I. V., Kazartsev D. A., Polyansky K. K., Magomedov G. O., Kopylov M. V., Plotnikov V. E. *Primeneniye metodiki sredneintegralnoy otsenki vodouderzhivayushchey sposobnosti sakharosoderzhashchikh produktov v konditerskom proizvodstve* [Application of the methodology of the average integral assessment of the water retention capacity of sugar-containing products in confectionery production]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*, 2024, vol. 54, no. 3, pp. 436-451.

Статья поступила в редакцию 13.03.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 08.12.2025
The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 08.12.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Анатольевич Казарцев – доктор технических наук; заведующий кафедрой технологии виноделия, броидильных производств и химии им. Г. Г. Агабальянца; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); kda_79@mail.ru

Алексей Николаевич Харин – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры управления, организации производства и отраслевой экономики; Воронежский государственный университет инженерных технологий; a_kharin@mail.ru

Алексей Андреевич Берестовой – кандидат технических наук; доцент кафедры информационной безопасности; Воронежский государственный университет инженерных технологий; berestovoy_1991@mail.ru

Даниил Сергеевич Хатунцов – аспирант кафедры ихтиологии и рыбоводства; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); d.khatuntsov@gmail.com

Алексей Васильевич Антипов – кандидат технических наук; доцент кафедры экологии и природопользования; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); a225306@yandex.ru

Dmitry A. Kazartsev – Doctor of Technical Sciences; Head of the Department of Winemaking Technology, Fermentation Production and Chemistry named after G. G. Agabalyants; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); kda_79@mail.ru

Alexey N. Kharin – Candidate of Physico-Mathematical Sciences; Assistant Professor of the Department of Management, Production Organization and Industrial Economics; Voronezh State University of Engineering Technologies a_kharin@mail.ru

Alexey A. Berestovoy – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Information Security; Voronezh State University of Engineering Technologies; berestovoy_1991@mail.ru

Daniil S. Khatuntsov – Postgraduate Student of the Department of Ichthyology and Fish Farming; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); d.khatuntsov@gmail.com

Alexey V. Antipov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ecology and Nature Management; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); a225306@yandex.ru

